

数字孪生装配单元建模与质量优化控制框架研究

王蕊^{1,2}, 周光辉^{1,3}, 张超^{1,3}, 马东旭¹, 门松辰¹, 邹永成¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安建筑科技大学理学院, 710055, 西安;
3. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室, 710054, 西安)

摘要: 针对复杂产品装配质量保障难题,提出数字孪生正向推演、逆向溯源与靶向优化相结合的装配单元建模与质量管控方法,实现装配质量可视化仿真、预测与全流程优化管控。构建物理层、孪生层与应用层三位一体的数字孪生装配单元参考框架,揭示装配质量动态形成机理与精准调控机制;提出制造误差、装配变形和定位误差多维融合的数字孪生装配单元建模技术,解决传统仅考虑单一误差的建模方法导致的模型不准确的问题;在此基础上,研究基于雅可比矩阵与小位移旋量的装配精度预测方法,构建装配偏差主关联工序/工艺参数精准误差溯源模型,突破装配质量偏差多目标优化与调控技术,形成装配全过程的正向推演、逆向溯源与靶向优化技术体系。开发软硬件集成的数字孪生装配单元原型系统,实现在固体火箭发动机喷管装配过程中的应用验证,有效提升固体火箭发动机喷管装配过程建模精度与质量管控效率。

关键词: 数字孪生装配单元;精度预测;误差溯源;质量优化

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202605014 **文章编号:** 0253-987X(2026)05-0142-11

Research on Digital Twin Assembly Cell Modeling and Quality Optimization Control Framework

WANG Rui^{1,2}, ZHOU Guanghui^{1,3}, ZHANG Chao^{1,3}, MA Dongxu¹,
MEN Songchen¹, ZOU Yongcheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the challenge of ensuring assembly quality for complex products, this study proposes an assembly cell modeling and quality control method that integrates digital twin forward deduction, reverse traceability, and targeted optimization, achieving visual simulation, prediction, and full-process optimization control of assembly quality. First, a three-in-one digital twin assembly cell reference framework consisting of a physical layer, a twin layer, and an application layer was constructed to reveal the dynamic formation mechanism and precise regulation mechanism of assembly quality. A digital twin assembly cell modeling technology which integrates multiple dimensions including manufacturing errors, assembly deformations, and positioning errors was proposed, addressing the inaccuracy issues caused by traditional modeling methods that consider

only single error sources. Based on this, an assembly accuracy prediction method using Jacobian matrices and small displacement torsors was studied. A precise error traceability model for key assembly deviation-related processes/process parameters was established. Multi-objective optimization and control technologies for assembly quality deviations were developed, forming a technical system that integrates forward deduction, reverse traceability, and targeted optimization throughout the entire assembly process. A prototype system for a digital twin assembly cell integrating software and hardware was developed and validated in the assembly process of a solid rocket engine nozzle, effectively improving the modeling accuracy and quality optimization control efficiency of the solid rocket engine nozzle assembly process.

Keywords: digital twin assembly cell; accuracy prediction; error traceability; quality optimization

随着复杂产品向复杂化、集成化、精密化等方向发展,其性能指标要求持续提升。装配是制造的最终环节,装配质量是保障复杂产品性能与指标实现的基石^[1-2]。然而,当前装配关键质量指标通常在最终形成阶段才能检测,且部分质量指标位于结构体内部,质量检测困难、效率低下,存在装配质量不可观问题;产品装配工序复杂、柔性结构易变形,装配质量易受多误差耦合影响,导致装配精度难预测;装配过程依赖人工目测观察,无法快速辨识误差源,导致装配误差难溯源;装配采用事后调控策略,缺乏及时有效的质量管控手段,导致装配质量难以优化控制。

近年来,数字孪生凭借实时感知、可视化仿真与多尺度控制能力,已成为解决装配质量问题的关键使能技术,并受到国内外学者的广泛关注。

在解决装配质量不可观、难预测问题方面,Pabolu 等研究了基于数字孪生的人机协同装配框架,通过数字孪生可视化仿真有效支撑了装配过程的人在环决策^[3];De Winter 等研究了基于数字孪生的装配过程可视化仿真技术,解决了装配机器人快速路径规划与智能避障问题^[4];Caputo 等引入数字孪生与人体工程学,通过数字孪生可视化仿真实现了复杂产品装配生产线快速设计与迭代^[5];胡兴等研究了基于数字孪生的复杂产品装配过程实时可视化监控与运行状态在线分析方法,为卫星装配过程可视化监测与管控提供支撑^[6-7];易扬等通过采用线性离散状态空间模型构建了复杂产品装配过程误差传递与累积表达式,对融合制造误差、变形误差的产品精度进行预测^[8];张膺之等建立了体现时变性的转、静子装配间隙动态预测与调控数字孪生模型,通过实测数据驱动实现装配间隙在线预测^[9]。

在解决装配质量难溯源、难以优化控制问题方面,Bilberg 等构建了基于数字孪生的人机协同装配

系统,实现了装配过程自动化与柔性化^[10];Majdzik 等将数字孪生引入生产系统,实现了装配机器人与自动引导小车的容错控制^[11];Rezaei 等利用数字孪生数据优势,提出了一种改进装配几何质量的个性化定位器调整方法^[12];Zhuang 等从粒度、周期和版本 3 个维度分析装配数据动态演化过程,构建了基于数字孪生的装配数据管理和复杂产品过程可追溯性框架^[13-14];鲍劲松等针对复杂装配过程任务异构复杂、环境动态多变及交互实时等特点,提出了增强现实(AR)与数字孪生驱动的智能装配技术,有效提高了装配效率^[15-17];周光辉等设计了基于数字孪生人机智能协同装配框架,将数字孪生感知、控制能力与 AR 虚拟现实交互能力相结合,实现了大型固体火箭发动机装配过程关键装配质量指标在线预测与溯源^[18-23]。

综上所述,现有研究探索了数字孪生与各类装配场景的融合,致力于实现装配过程质量管理与控制。然而,诸多研究缺乏多源异构装配数据优化管理,导致所建数字孪生装配模型精度不足;装配误差建模研究仅考虑部分误差因素影响,忽略了各误差因素耦合关系;未充分利用装配现场实时数据,影响装配过程在线预测精度、误差溯源分析结果有效性和质量优化控制效果。此外,为确保装配质量、缩短装配周期,复杂产品更多地采用划分装配单元进行装配生产^[2,24],目前鲜有文献以装配单元为场景展开装配质量研究工作。

基于以上分析与思考,在课题组前期相关研究成果^[1,18-23,25-28]基础上,本文以复杂产品装配的基本实现单元——装配单元为研究对象,从数据-知识混合驱动角度出发,提出了一种数字孪生装配单元(DTAC)建模与质量优化控制方法,揭示 DTAC 异构数据、知识和物理世界多层次上的交互与共融机理,研究 DTAC 误差耦合传递机理与演变规律,主

要考虑装配过程中制造误差、变形误差、定位误差及其传递对装配质量的影响,明晰 DTAC 装配质量控制逻辑,构建多维误差融合的数字孪生装配模型及其驱动的装配质量正向推演、逆向溯源和靶向优化实现。据此研究 DTAC 的多维误差数字孪生装配模型构建、装配精度预测、装配误差溯源、装配质量优化与调控 4 项关键使能技术,从而实现 DTAC 的智能、高效运行,最终为研究和践行复杂产品智能装配提供理论与方法指导。

1 DTAC 体系框架

1.1 DTAC 相关定义

装配单元(AC)指单元式装配生产中将装配零部件(AP)、智能装配设备(SAD)、传感网络(SN)、智能网关(SG)^[25]等装配资源按照装配工序集中原则布置在有限且集中的物理空间中,形成独立的模块化的装配全要素实体。

本文所指的装配单元具有开放系统,支持工业机器人等装配设备运行状态数据读取及数控(NC)代码写入,结合 SN,通过 SG 实现 AC 实时运行数据的上传及控制指令的下达,典型的数字孪生装配单元实例如图 1 所示。



图 1 喷管装配单元

Fig. 1 Nozzle assembly cell

1.2 DTAC 参考框架

在数字孪生框架构建方面,陶飞等提出了能适用不同领域、不同应用对象的数字孪生五维模型参考框架,包含物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据及各组成部分间连接^[29];丁凯等构建了包含物理空间、信息空间、业务交互空间三者共融的面向大规模个性化产品制造的智能制造空间^[30];周光辉团队前期以制造单元为研究对象,从数据-知识混合驱动角

度,构建了包含物理空间、虚拟空间、数据空间、知识空间、业务交互空间五者泛在融合的面向智能化、自治化生产的五维智能时空^[25]。

为实现复杂产品装配过程可视化、精度可预测、误差可溯源、质量可优化与控制,需基于数字孪生技术,在装配过程异构数据、知识、物理世界、虚拟世界交互与共融基础上,发展 DTAC 建模与质量优化控制理论和方法。本文基于上述研究启发,1.1 节定义及装配实验平台,从功能需求和应用服务角度出发,设计了如图 2 所示的 DTAC 参考框架,包含物理层、孪生层和应用层 3 个层次。

(1)物理层。物理层是数字孪生装配单元中的各类物理实体,是实现孪生装配模型功能和任务的主要工具和载体,同时是装配过程中各类数据生产者和决策执行者,包括但不限于工业机器人、装配零部件、工装设备、智能网关、扫描仪、各类智能传感器等。物理层通过 SN 感知 AP 和 SAD 等装配过程数据,并将其通过 SG 实时上传至孪生数据感知模块,同时通过 SG 接收虚拟端的控制指令,实现装配过程质量优化控制。

(2)孪生层。孪生层是 DTAC 运行的核心,主要包含装配资源数字孪生模型、多维误差模型、装配精度预测模型、装配误差溯源模型和装配质量优化模型。

考虑到原始装配过程数据不直观、难利用,需要根据数据类型与应用场景,对装配过程数据进行分析与建模,并在此基础上开展装配平台虚拟模型构建。数据感知模型、装配知识库与装配平台虚拟模型融合而成的装配资源孪生模型可实现装配体内部结构以及装配过程数据可视化,并为后续装配质量管控提供动态更新的数据、知识与模型支持。数据感知模型从多源异构装配数据解析、集成与存储角度出发,研究数据感知模型的构建方法;装配知识库构建主要包含装配知识分类、信息模型构建、标准化处理及存储;虚拟模型是装配实验平台的孪生镜像,在数据感知模型与装配知识库的支持下,能够随物理装配实验平台同步运动,支持任意角度观测装配体内部结构。

多维误差模型是产品质量管控的核心基础模型。充分考虑装配过程中零件制造误差、装配变形误差和装配定位误差等多维误差因素的影响,利用现场实时数据,建立动态更新的多维误差模型,可为后续装配精度预测、误差溯源及质量优化与调控提供有效的模型与数据支撑。多维误差模型构建包括:通过点云数据配准与分割技术构建点云几何模

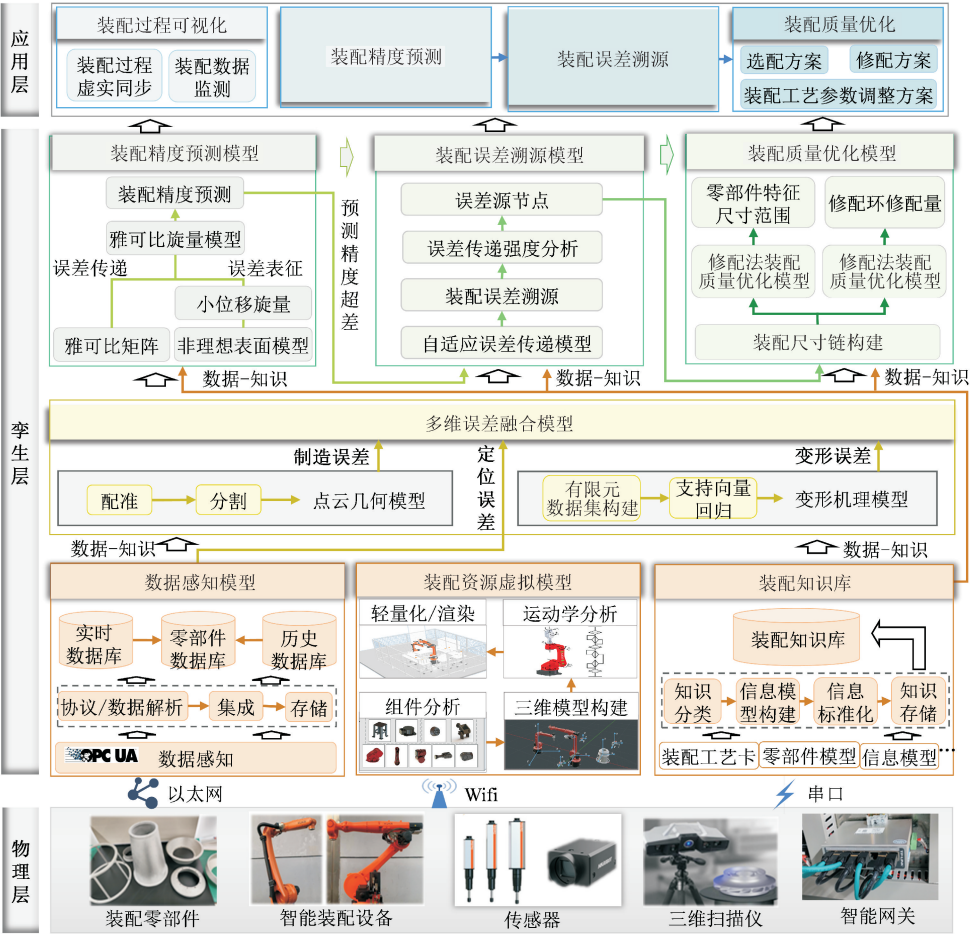


图 2 DTAC 参考框架
Fig. 2 Reference framework of DTAC

型,表征零件制造误差;通过有限元分析构建样本数据,采用支持向量回归法构建变形机理模型,表征装配变形误差;融合制造误差、变形误差及现场测量的定位误差,构建数字孪生装配单元的多维误差融合模型。

在装配过程中,依据历史与实时装配数据,考虑多维误差影响,构建及时、有效的装配精度在线预测模型是提高产品装配质量的重要手段。在多维数字孪生模型基础上,根据装配结构构建表达误差传递的雅可比矩阵;通过基于点云非理想表面模型接触状态计算,求得用于误差表征的小位移旋量(SDT);结合雅可比矩阵和小位移旋量构建雅可比旋量模型,实现装配精度在线预测。

针对前一步装配精度预测不满足装配要求的异常情况,需要进行逆向装配误差溯源,以便开展针对性的质量控制。本文结合数据感知模型、装配知识库,构建了数据-知识混合驱动的装配误差溯源模型。通过构建装配工序自适应生长误差传递模型实现实

时误差传递建模,在此基础上,采用逆回溯算法与误差传递强度分析方法,完成装配误差的在线溯源分析。

开展针对装配误差源的质量优化能有效保证产品性能。本文基于误差溯源分析结果,构建了关键质量指标约束的装配尺寸链。在此基础上,分别建立两类装配质量优化模型:一类面向由零部件制造误差引发装配质量问题的选配法模型;另一类面向选配法失效或装配定位误差引发装配质量问题的修配法模型。通过算法优化,结合装配知识库与零部件数据库,生成可读性强的装配质量优化方案,并结合孪生模型指导装配生产。

(3)应用层。通过应用层,DTAC 能够实现装配过程虚实同步及装配过程数据监测,支撑复杂产品装配可视化。装配过程能够按照“正向推演发现问题—逆向溯源根因分析—靶向优化解决问题”的闭环控制逻辑,可为复杂产品提供装配精度在线预测、装配误差在线溯源分析及装配质量优化调控,最终实现装配单元质量智能管理与控制。

征、零部件及其组件等,节点通过有向边连接,有向边代表各类约束或装配关系。再从 CAD 模型、产品模型数据交换标准(STEP)模型、装配工艺卡、信息模型等原始数据中提取关键数据,主要包括 CAD 模型转换后的 3DXML 格式数据、STEP 文件中零部件特征级信息、装配工艺卡中工步和工序及关联设备等信息、装配设备信息模型 XML 文档中设备属性及数据与动作信息,将这些数据根据模板生成标准化 JavaScript 对象表示法(JSON)数据,实现信息标准化处理。在知识图谱的基础上,采用 Neo4j 图数据库搭建装配知识库。

虚拟模型是装配实验平台的动态孪生镜像。本文从设备组件分析、三维模型构建、运动学分析、模型轻量化与渲染角度出发,构建装配实验平台虚拟模型。首先,根据装配实验平台部件的结构、功能特性,将平台划分为单元级、组件级和系统级;再采用三维建模软件绘制单元级三维模型,并按照组件间装配关系进行组合装配,获得系统级装配实验平台三维模型;然后,结合装配实验平台各组件间运动关系,采用 Blender 软件完成各组件坐标系统一及约束关系定义;最后,对装配实验平台模型进行轻量化处理,将精简后的模型进行渲染处理,精准实现视觉上的孪生。

2.1.2 多维误差数字孪生模型构建

影响装配质量的误差源于多个维度,应结合历史、实时数据,建立动态更新的制造误差、变形误差、定位误差融合的多维误差数字孪生模型,如图 4 所示。该模型构建主要包含基于实测点云制造误差建模、装配现场变形机理建模及多维误差模型融合 3 部分^[18]。

首先通过三维扫描仪采集零件表面实测点云数据,通过点云库工具对设计 CAD 模型表面进行均匀采样,获取 CAD 模型点云数据;然后,采用迭代最近点(ICP)算法将实测点云与设计 CAD 模型点云进行配准;再通过点云分割从整体点云数据中分割出表征零部件关键结合面装配特征的点云数据,刻画零件的制造误差。基于数据感知模型获取装配实时数据,推演装配变形误差。通过有限元方法分析关键工序结合面变形信息;采用正交实验法构建大量样本数据;再通过支持向量回归法训练样本数据,获得载荷和节点变形的映射模型,即装配变形机理模型,实现装配变形误差的在线快速计算。装配变形误差和零件制造误差最终均通过几何尺寸变化影响产品装配精度,因此可将变形误差融合到点云

几何模型中,即根据有限元节点坐标和点云坐标的对应关系,采用重心坐标插值计算,将有限元节点变形叠加到特征点云上,实现变形误差和制造误差融合。根据实时数据库中定位误差可获得装配面偏移信息,再基于刚体空间坐标变换矩阵,完成装配定位误差向点云几何模型的融合。

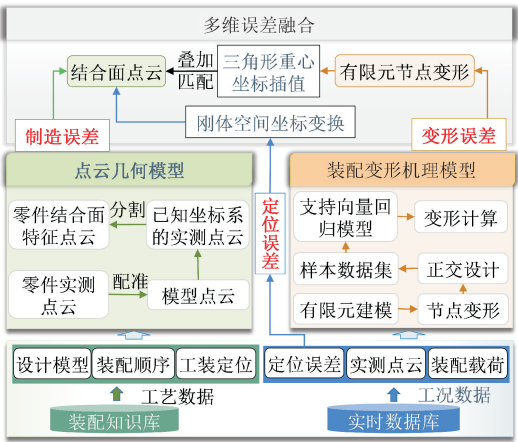


图 4 多维误差数字孪生模型构建
Fig. 4 Multi-dimensional error digital twin modeling

2.2 装配精度预测

本节以结合面为误差传递节点,考虑多维误差,结合动态数字孪生装配模型,通过构建雅可比旋量模型,以雅可比矩阵表示误差传递,以小位移旋量表征节点误差,实现装配精度在线预测^[18],如图 5 所示。

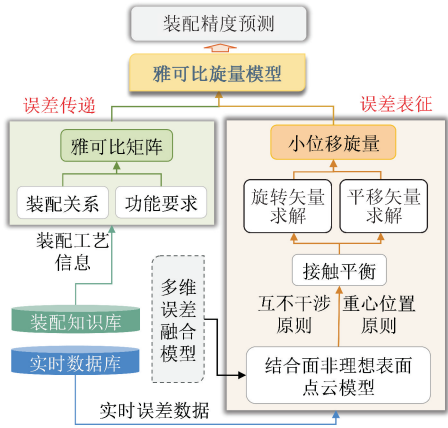


图 5 装配精度预测
Fig. 5 Assembly accuracy prediction

依据装配知识库中装配工艺信息,结合装配特征节点间装配关系和功能要求构建雅可比矩阵,用于装配误差在结合面之间的传递计算。小位移旋量由各零部件表面特征变动决定,充分考虑形状误差影响,其计算过程如下。首先,采用实测零部件三维

点云构建结合面非理想表面点云模型;再结合多维误差模型,计算基于点云的非理想表面模型接触状态,在满足装配特征互不干涉原则和重心位置原则条件下,通过算法得到结合面接触平衡状态,获取平衡接触点;依据平衡接触点,确定两个非理想表面接触面位姿,计算旋转矢量和平移矢量,进而得到真实接触状态下装配结合面的小位移旋量;最后结合雅可比矩阵和小位移旋量构建雅可比旋量模型,该模型基于动态变化的数字孪生装配模型,根据装配体当前装配状态和未装配零部件的理论工艺数据,实现装配精度在线预测。

2.3 装配误差溯源

针对装配质量异常问题,本节结合装配现场数据与知识,提出一种数据-知识双驱动的装配误差在线溯源分析方法^[19],如图 6 所示。

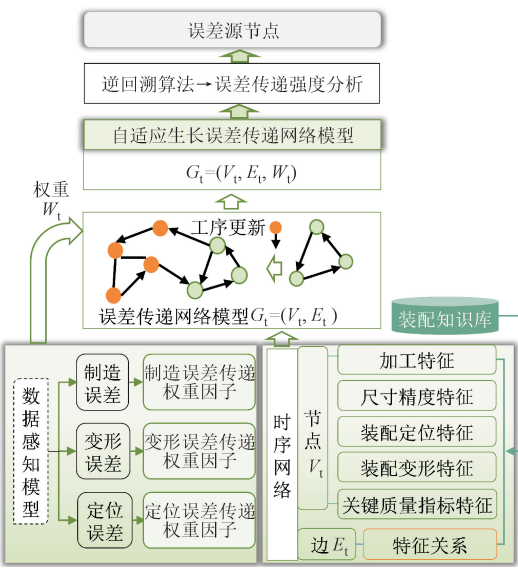


图 6 装配误差溯源

Fig. 6 Assembly error traceability

首先,基于时序网络构建误差传递网络模型。将误差传递网络的节点设置为尺寸精度特征节点、装配定位特征节点、装配变形特征节点及关键质量指标特征节点,设置加工特征节点刻画误差传递路径。节点间连接边体现特征关系,通过装配顺序确定。加工特征节点间连接由先安装节点指向后安装节点;接着演化出该加工特征节点的尺寸精度特征节点;再演化出对该特征节点有影响的装配变形特征节点;采用无向边将关键质量指标特征节点与关联的加工特征节点相连。以上特征节点与特征间关系均可从装配知识库获取。当装配进入新工序,新零部件加入,则更新误差传递网络节点或连边。在

数据感知模型基础上,融入多维误差现场数据,通过计算制造误差传递权重因子、变形误差传递权重因子、定位误差传递权重因子,对误差传递网络进行边权赋值或更新,刻画误差传递强度,实现自适应生长误差传递网络模型构建。

在自适应生长误差传递网络模型中,装配误差通过网络节点进行传递、累积与演化。网络中各节点之间通过混合边连接,两节点间连接多路径,途经多节点,因此异常质量特征节点受尺寸精度特征节点、装配定位特征节点、变形特征节点等多个误差源节点共同影响。为确定影响最大的误差源节点,需回溯传递路径中的所有节点,筛选出所有参与误差传递的节点,再计算各节点对异常质量特征节点的误差传递强度,实现最大误差源节点的识别,完成装配误差的在线溯源分析。

2.4 装配质量优化与调控

本节针对装配误差源,从零部件选配、修配和装配工艺参数调整角度进行装配质量优化与调控,如图 7 所示。

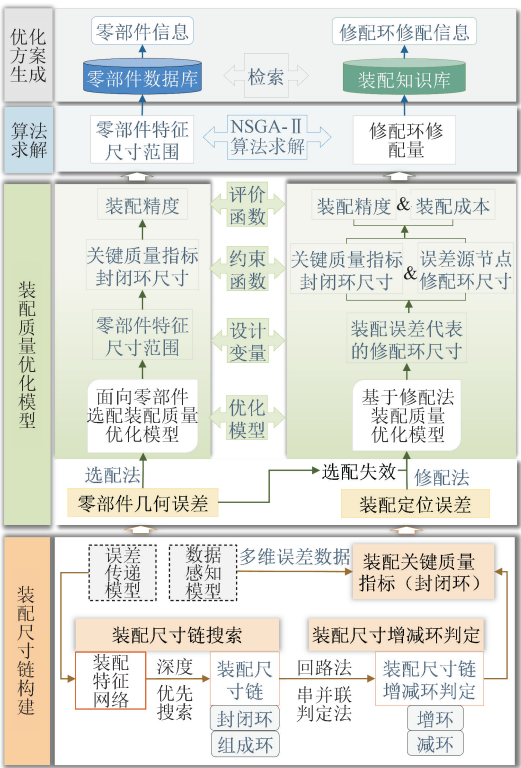


图 7 装配质量优化与调控

Fig. 7 Assembly quality optimization and regulation

装配尺寸链能够实现装配关键质量指标约束,本节从装配尺寸链搜索与判定角度出发,构建装配尺寸链。首先,以误差传递模型中装配特征网络为

基础,采用深度优先搜索算法对该网络进行环路搜索,获得装配尺寸链的封闭环与组成环;采用回路法对环路进行修正,标记并联特征节点,基于串、并联特征节点,采用串并联判定法进行增环、减环判定;将部分关键质量指标作为封闭环,结合数据感知模型中的多维误差数据,实现关键质量指标约束函数构建^[23]。

针对因零部件制造误差导致的装配质量问题,以零部件特征尺寸范围为设计变量,关键质量指标封闭环尺寸允许变动范围为约束函数,装配精度为评价函数,构建面向零部件选配的质量优化模型;通过 NSGA-II 算法对模型进行求解^[23],获得零部件特征尺寸的范围;结合零部件数据库检索出符合要求的同类零部件信息,生成包含待选配零部件的名称、编号、相关尺寸以及预期优化结果的选配方案。

修配法是通过修配某一组成环的尺寸,使封闭环达到规定精度要求的方法。关键质量指标装配尺寸链封闭环尺寸不仅受零部件制造误差影响,也受装配定位误差影响,通过修配定位误差组成环尺寸,也可使关键质量指标精度满足要求,因此本节修配法对象包含零部件特征尺寸修配和关键质量指标定位误差组成环修配。针对选配法失效或装配定位误差带来的装配质量问题,以装配误差源所代表的修配环尺寸为设计变量,以存在质量问题的关键质量指标封闭环尺寸和误差源节点修配环尺寸允许变动范围为约束函数,以装配精度-成本为评价函数,构建基于修配法的装配质量优化模型,通过 NSGA-II 算法对模型进行求解,获得修配环的修配量。通过装配知识库查询,生成包含装配工序、装配工步、调整量等信息的修配方案或装配工艺参数调整方案。

3 DTAC 原型开发与案例验证

3.1 原型系统开发

本节选取固体火箭发动机喷管作为研究对象,在固体火箭发动机喷管智能装配实验平台上进行案例验证,实验平台如图 1 所示,该平台包含 1 台搬运机器人、1 台拧紧机器人、1 套仓储架、1 套三维扫描仪(测量精度 0.015 mm)、1 把螺丝枪、1 台 2 000 万像素视觉相机、1 台三坐标测量仪、若干智能网关、1 套看板系统。喷管模型材质为 6061 铝合金,由 6 个零部件组成,连接螺栓规格为 M5×10。上述硬件设备构成了喷管智能装配单元,为 DTAC 软件平台开发和集成应用奠定了基础。

喷管模型结构图和装配工序示意图如图 8 所示,首先装配柔性接头和固定体(工序 1),形成组件 1;然后装配保护段和扩张段(工序 2),形成组件 2;再装配两个组件(工序 3),形成组件 3,最后依次在组件 3 上装配 HC 组件(工序 4)和接头防热环(工序 5)。装配工序 1、工序 3 为螺栓连接,工序 4、工序 5 为胶接连接,工序 2 没有装配连接操作。

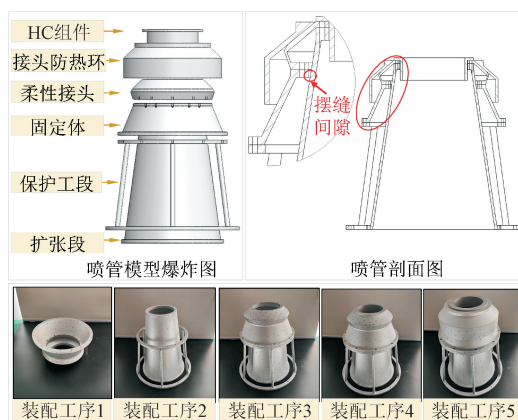


图 8 喷管结构及装配工序示意图

Fig. 8 Overall structure of nozzle and assembly process diagram for nozzle

采用 B/S(Browser/Server)架构开发数据层-业务层-视图层 3 层结构化平台。其中,数据层用来实现对数据的采集、标准化与存储,为平台各功能模块提供数据支持;业务层主要集中各种模型和算法,可通过数据接口获取数据,并响应视图层请求,该层基于 SpringBoot 框架、采用 Python 语言开发,是实现虚实同步、装配质量预测、误差溯源、质量优化与调控功能的核心;视图层是基于 HTML、CSS、Vue 等技术框架构建,可接收用户的请求并转发至业务层,待业务层对请求响应后将结果进行可视化展示,是虚实同步可视化展示与系统用户交互窗口。

3.2 DTAC 应用案例

课题组前期以固体火箭发动机喷管装配单元为典型应用场景,已分别围绕装配精度预测^[18]、装配误差溯源^[19]和装配质量优化^[23]等单点技术进行了研究和案例验证。在此基础上,本节从 DTAC 整体框架角度出发,以直接影响火箭调姿能力和飞行成功率的喷管摆缝间隙为控制目标,围绕喷管数字孪生装配建模、喷管摆缝间隙精度预测、误差溯源和质量优化与调控进行案例研究,验证本文所提框架方法的可行性和有效性。

喷管数字孪生装配单元如图 9 所示,包括物理空间和虚拟空间。物理空间包括工业机器人、三维

激光扫描仪、工装夹具等装配资源,能够实现喷管的自动化装配与测量。虚拟空间是物理空间的数字化镜像模型,能够实时接入物理空间的装配数据,实现装配全过程的可视化仿真与虚实同步运行,有效解

决了喷管装配过程不可检、不可见导致的质量保障问题。在此基础上,虚拟空间集成了喷管装配精度预测模型、误差溯源模型和装配调控模型,支持喷管装配过程的智能分析与闭环调控。

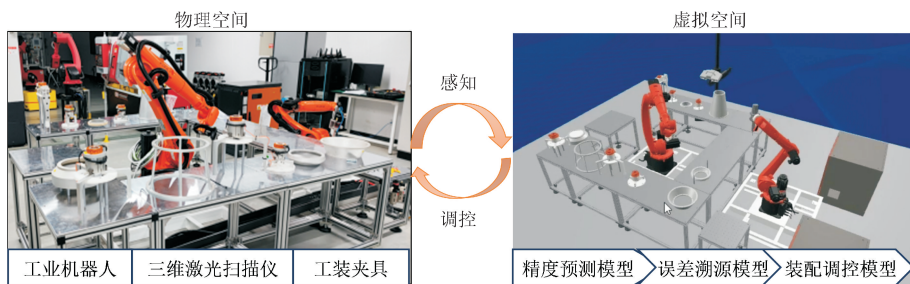


图9 喷管数字孪生装配单元原型系统

Fig. 9 Prototype system of digital twin assembly cell for nozzle

具体地,图9中喷管精度预测模型根据喷管间隙等指标的特征与装配路径上各结合面的位置关系计算雅可比矩阵,各雅可比矩阵与喷管零部件关键特征一一对应;进一步依据零部件关键特征及结合面间接触点,计算每道工序安装后下一道工序安装前对应的小位移旋量;通过雅可比旋量模型和已知的小位移旋量计算出摆缝间隙的功能需求,实现当前装配状态下的摆缝间隙精度预测。当预测精度超差时,喷管误差溯源模型将自适应生长误差传递网络模型中摆缝间隙节点设置为溯源起始节点,并采用逆回溯算法对误差传递模型进行搜索,获得影响节点;采用误差传递强度分析方法计算这些节点对摆缝间隙的误差传递强度,获得误差源节点。针对误差源节点,喷管装配调控模型采用选配法或修配法对装配工艺进行优化,实现装配偏差主关联工序/工艺参数的优化与调控。

4 结 论

本文以复杂产品装配单元为研究对象,从数据-知识混合驱动角度出发,提出了一种新的数字孪生装配单元建模与控制方法,阐述了DTAC的基本定义、参考框架及关键使能技术,并通过案例对所提模型和方法进行了验证。

(1)从物理层、孪生层和应用层3个层次阐述了DTAC的基本定义和理论构型,设计了集3个层次于一体的DTAC参考框架,明晰了DTAC动态形成机理和调控机制。

(2)研究了支撑DTAC的多维误差数字孪生装配建模、装配精度预测、装配误差溯源和装配质量优

化与调控4项关键使能技术,实现了DTAC的智能运行。

(3)依托西安交通大学喷管装配单元实验平台,构建了软硬件集成的DTAC原型系统,并以喷管装配过程为例,对所提理论、技术和模型的有效性和实用性进行了验证。

本文通过在复杂产品装配中引入数字孪生技术,实现了装配过程可观/可检、装配精度可预测、装配误差可溯源、装配质量可优化与调控,有效保障了产品装配质量。下一步,将重点研究复杂产品装配关键工序及不可逆工序装配工艺方案在线高效动态优化与调整技术。

参考文献:

- [1] ZHOU Guanghui, ZHANG Chao, LI Zhi, et al. Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(4): 1034-1051.
- [2] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110-132.
GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132.
- [3] PABOLU V K R, SHRIVASTAVA D, KULKARNI M S. A digital-twin based worker's work allocation framework for a collaborative assembly system [J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(10): 1887-1892.

- [4] DE WINTER J, EI MAKRINI I, VAN DE PERRE G, et al. Autonomous assembly planning of demonstrated skills with reinforcement learning in simulation [J]. *Autonomous Robots*, 2021, 45(8): 1097-1110.
- [5] CAPUTO F, GRECO A, FERA M, et al. Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 71: 20-31.
- [6] 胡兴, 刘检华, 庄存波, 等. 基于数字孪生的复杂产品装配过程管控方法与应用 [J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 642-653.
- HU Xing, LIU Jianhua, ZHUANG Cunbo, et al. Digital twin-based management method and application for the complex products assembly process [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 642-653.
- [7] 张佳朋, 刘检华, 龚康, 等. 基于数字孪生的航天器装配质量监控与预测技术 [J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 605-616.
- ZHANG Jiapeng, LIU Jianhua, GONG Kang, et al. Spacecraft assembly quality control and prediction technology based on digital twin [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 605-616.
- [8] 易扬, 冯锦丹, 刘金山, 等. 复杂产品数字孪生装配模型表达与精度预测 [J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 617-630.
- YI Yang, FENG Jindan, LIU Jinshan, et al. Model expression and accuracy prediction method of digital twin-based assembly for complex products [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 617-630.
- [9] 张膺之, 孙惠斌, 周平, 等. 数字孪生驱动的转静子装配间隙动态预测与调控 [J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 2035-2046.
- ZHANG Yingzhi, SUN Huibin, ZHOU Ping, et al. Digital twin-driven dynamic prediction and control method for assembly clearance of multi-stage rotor and stator [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(6): 2035-2046.
- [10] BILBERG A, MALIK A A. Digital twin driven human-robot collaborative assembly [J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 499-502.
- [11] MAJDIK P, WITCZAK M, LIPIEC B, et al. Integrated fault-tolerant control of assembly and automated guided vehicle-based transportation layers [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2022, 35(4/5): 409-426.
- [12] REZAEI ADERIANI A, WÄRMEFJORD K, SÖDERBERG R, et al. Individualizing locator adjustments of assembly fixtures using a digital twin [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2019, 19(4): 041019.
- [13] ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1): 1149-1163.
- [14] ZHUANG Cunbo, GONG Jingcheng, LIU Jianhua. Digital twin-based assembly data management and process traceability for complex products [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58 (Part B): 118-131.
- [15] 鲍劲松, 张荣, 李婕, 等. 面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(18): 103-115.
- BAO Jinsong, ZHANG Rong, LI Jie, et al. Digital-twin collaborative technology for human-robot-environment integration [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(18): 103-115.
- [16] 孙学民, 刘世民, 申兴旺, 等. 数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(6): 1704-1716.
- SUN Xuemin, LIU Shimin, SHEN Xingwang, et al. Digital twin-driven intelligent assembly method for high precision products [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(6): 1704-1716.
- [17] 丁志昆, 孙奕程, 段亮亮, 等. 基于数字孪生的增强现实多人协作装配 [J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 2019-2034.
- DING Zhikun, SUN Yicheng, DUAN Liangliang, et al. AR multiplayer collaborative assembly method based on digital twin [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(6): 2019-2034.
- [18] 周光辉, 邹永成, 张超, 等. 考虑多维误差的复杂装配过程数字孪生建模方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 1824-1839.
- ZHOU Guanghui, ZOU Yongcheng, ZHANG Chao, et al. Digital twin modeling method for complex assembly process considering multidimensional error [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(6): 1824-1839.
- [19] 门松辰, 周光辉, 张超, 等. 基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(1): 175-184.

- MEN Songchen, ZHOU Guanghui, ZHANG Chao, et al. Assembly error modeling and traceability analysis method based on digital twin [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 175-184.
- [20] MA Dongxu, ZHOU Guanghui, ZHANG Chao, et al. A digital twin-driven framework for the online prediction and control of assembly quality toward the solid rocket engine [C]//2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1773-1778.
- [21] ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, MA Dongxu, et al. A deep learning-enabled human-cyber-physical fusion method towards human-robot collaborative assembly [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 83: 102571.
- [22] ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, MA Dongxu, et al. Digital twin-driven multi-dimensional assembly error modeling and control for complex assembly process in Industry 4.0 [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 60: 102390.
- [23] ZHANG Chao, YU Yongrui, ZHOU Guanghui, et al. Hybrid mechanism and data-driven digital twin model for assembly quality traceability and optimization of complex products [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62, Part B: 102707.
- [24] 张嘉锟, 陈琨, 于慧, 等. 面向误差传递的复杂机械产品装配单元划分方法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 86-94.
- ZHANG Jiakun, CHEN Kun, YU Hui, et al. Assembly unit partitioning method of complex mechanical products for error propagation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(4): 86-94.
- [25] 张超, 周光辉, 李晶晶, 等. 新一代信息技术赋能的数字孪生制造单元系统关键技术及应用研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 329-343.
- ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, LI Jingjing, et al. Research on key technologies and application of new IT-driven digital twin manufacturing cell system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 329-343.
- [26] 张超, 周光辉, 肖佳诚, 等. 数字孪生制造单元多维度尺度建模与边-云协同配置 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(2): 355-371.
- ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, XIAO Jiacheng, et al. Multi-dimensional and multi-scale modeling and edge-cloud collaborative configuration method for digital twin manufacturing cell [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(2): 355-371.
- [27] 张超, 周光辉, 李晶晶, 等. 面向航空复杂零件智能工艺规划的孪生工艺模型构建与应用研究 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 32-43.
- ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, LI Jingjing, et al. Research on the construction and application of digital twin process model for intelligent process planning of aviation complex parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(6): 32-43.
- [28] 常丰田, 周光辉, 李锦涛, 等. 边-云协同下智能制造单元的物联网协调配置方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 184-194.
- CHANG Fengtian, ZHOU Guanghui, LI Jintao, et al. Coordinated configuration method for internet of things network of smart manufacturing cells under edge-cloud collaboration [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 184-194.
- [29] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [30] 丁凯, 张旭东, 周光辉, 等. 基于数字孪生的多维度智能制造空间及其建模方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1491-1504.
- DING Kai, ZHANG Xudong, ZHOU Guanghui, et al. Digital twin-based multi-dimensional and multi-scale modeling of smart manufacturing spaces [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1491-1504.

(编辑 武红江)